Coupled-channels analyses for heavy-ion fusion reaction and quasielastic scattering around the Coulomb barrier

著者	Muhammad Zamrun　F
号	51
学位授与番号	2405
URL	http://hdl.handle.net/10097/39473

氏名・（本籍）	Muhammad Zamrun F.（ムハッマド ザムルン）
学位の種類	博　士（理　学）
学位記番号	理博第２４０５号
学位授与年月日	平成20年３月25日
学位授与の要件	学位規則第４条第１項該当
研究科，専攻	東北大学大学院理学研究科（博士課程）物理学専攻
学位論文題目	Coupled-channels analyses for heavy-ion fusion reaction and quasi-elastic scattering around the Coulomb barrier （クーロン障壁近傍における重イオン核融合反応及び準弾性散乱の結合チャンネル法による解析）
論文審査委員	（主査）准教授　萩野浩一 教　授　江澤潤一，笠木治郎太 准教授　篠塚　勉，中村　哲

論文目次

論 文 内 容 要 旨

The effect of channel couplings, that is, the coupling of the relative motion between the colliding nuclei to their intrinsic motions as well as transfer processes has been by now well known in heavy-ion collisions around the Coulomb barrier. These channel couplings replace a single barrier with many distributed barriers. In the fusion reaction, this barrier distribution can be extracted by taking the second derivative of the product of the center of mass energy, E, and the fusion cross section, σ_{fus}, with respect to *E, i.e.,* $D^{fus} = d^2(E\sigma_{fus})/dE^2$ and many experiments have been performed for that purpose.

A similar barrier distribution can also be obtained from the quasi-elastic scattering (a sum of elastic, inelastic scattering and transfer process) at backward angles. Fusion and quasi-elastic scattering are related to each other because of flux conservation, i.e., the fusion is determined by the penetration probability while quasi-elastic scattering by the reflection probability. The quasi-elastic barrier distribution is defined as the first derivative of the ratio of the quasi-elastic to Rutherford cross sections with respect to the energy, i.e. $D^{qel} = -d\,(d\sigma_{qel}/d\sigma_R)/dE$. Although there have been many studies on the properties of the fusion barrier distribution, D^{fus}, the theoretical investigation on the quasi-elastic barrier distribution, D^{qel}, has been rather scarce. The purpose of this thesis is to study the properties of the quasi-elastic barrier distribution in comparison with the fusion barrier distribution. The applicability of the barrier distribution concept in massive systems is also investigated.

A theoretical framework to describe the channel coupling is first reviewed. The coupled channels formalism is introduced using the so-called no-Coriolis approximation which reduces its dimensions. The method to solve the coupled-channels equations for heavy-ion fusion reaction and quasi-elastic scattering is formulated.

The coupled-channels equations are then applied to heavy-ion fusion reactions at sub-barrier energies. This aims at studying weather an analysis of fusion barrier distribution can probe the structure of ^{72,74}Ge. We discuss the possibility to probe the transitional shape of ^{74}Ge through the fusion reaction of ^{74}Ge+^{74}Ge. We also discuss the effect of shape admixture in the ground state of ^{72}Ge on the fusion of ^{72}Ge + ^{72}Ge.

We next apply the coupled-channels formalism to the large-angle quasi-elastic scattering. We first investigate the effects of anharmonic vibration in ^{144}Sm on ^{16}O+^{144}Sm scattering. The same coupling schemes which were previously used to explain the experimental fusion cross section and barrier distribution for the same system is employed. It is shown that the anharmonic excitations in ^{144}Sm play an important role in the description of experimental quasi-elastic cross section, although the quasi-elastic barrier distribution has a distinct high energy peak which is somewhat smeared in the experimental barrier distribution. The effect of proton transfer reaction on this system is also discussed. We suggest that the experimental data for the barrier distributions of fusion reaction and quasi-elastic scattering can not be accounted for simultaneously with the standard coupled-channels approach.

Finally, we carry out a detailed coupled-channels analysis for large-angle quasi-elastic scattering in massive systems. We perform a systematic study on the effects of multi-phonon excitations on the quasi-elastic cross sections as well as the barrier distributions for ^{48}Ti, ^{54}Cr, ^{56}Fe, ^{64}Ni, and ^{70}Zn + ^{208}Pb reactions. The present coupled-channels calculations well account for the overall width of the experimental barrier distribution for these systems. In particular, it is shown that the calculations taking into account single quadrupole phonon excitation in ^{48}Ti and triple octupole phonon excitations in ^{208}Pb reasonably well reproduce the experimental quasi-elastic cross section and barrier distribution for the ^{48}Ti + ^{208}Pb reaction. On the other hand, ^{54}Cr, ^{56}Fe, ^{64}Ni, and ^{70}Zn + ^{208}Pb systems seem to require the double quadrupole phonon excitations in the projectiles in order to reproduce the experimental data.

論文審査の結果の要旨

クーロン障壁近傍のエネルギー領域における重イオン核融合反応では、散乱核の構造（励起）が反応に強い影響を及ぼし、反応確率が著しく変化することが知られている。近年、この効果を「クーロン障壁の分布」という形で表わすことによって重イオン核融合反応の反応機構を理解するという方法が確立し、様々な系における解析が進んでいる。ところが、核融合反応を用いた解析では、核融合反応断面積の2階微分が必要となるため、実験データを精密に測定する必要がある。従って、このような解析は超重核合成反応や不安定核ビームを用いた実験では困難なものになっている。そこで最近注目されているのが、準弾性散乱を用いた障壁分布の解析法である。準弾性散乱は、障壁の透過と反射という意味で核融合反応と相補的であり、また、実験的にも核融合反応に比べて容易なものになっている。核融合障壁分布法が確立しているのに対し、準弾性散乱障壁分布法はまだ発展途上の段階であり、系統的な理論的及び実験的研究が必要とされてきた。特に、核融合障壁分布と準弾性散乱障壁分布の類似性は、これまで基底状態と強く結合する励起状態が存在する場合には示されていたが、弱く結合する多数の状態がある場合に同様の類似性があるかどうかは明らかではなかった。また、超重核合成反応のような重い系においても障壁分布の考えが成り立つのかどうかこれまで知られていなかった。

本研究では、結合チャンネル法を用い、$^{16}O+^{144}Sm$系、及び超重核合成反応である^{48}Ti, ^{54}Cr, ^{56}Fe, ^{64}Ni, ^{70}Zn $+^{208}Pb$ 系における準弾性散乱断面積及び準弾性散乱障壁分布の詳細な解析を行った。特に、^{144}Sm原子核の2重フォノン状態の非調和性の効果及び超重核合成反応における散乱核の多重フォノン励起の影響に関する議論を行った。

本研究によって、（1）非調和性2重フォノンのような結合が比較的弱い場合にも核融合障壁分布と準弾性散乱障壁分布の類似性が成り立つこと、（2）それにも関わらず$^{16}O+^{144}Sm$ 系においては核融合障壁分布と準弾性散乱障壁分布の実験データは若干異なる振る舞いを示しており、それは現在標準的に用いられている結合チャンネル法の改良が必要であることを示唆していること、（3）超重核領域のような重い系においても、適当な励起状態を考慮すると準弾性障壁分布の実験データが再現できること、が示された。これらの研究成果は準弾性散乱障壁分布法の有効性を明確に示すものであり、今後この分野の研究に大きく寄与するものである。

審査論文は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。従って、Muhammad Zamrun F. 提出の博士論文は、博士（理学）の学位論文として合格と認める。